

Расчет и конструирование Calculation and design

Научная статья

УДК 621.694

DOI: 10.14529/engin250201

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОПЛОВОГО УСТРОЙСТВА И ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ЖИДКОГО СНАРЯДА

М.А. Асфандияров¹, asfandiiarovma@susu.ru

Д.Р. Исмагилов¹, ismagilovdr@susu.ru

А.Х.М. Али¹, ahmadalhammory377@gmail.com

К.А. Губайдуллина², ksenya-aleksandrovna@list.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² МАОУ «Гимназия № 23», Троицк, Россия

Аннотация. В статье рассмотрено влияние геометрических параметров соплового устройства и времени истечения жидкости через сопло на кинетическую энергию, получаемую жидким снарядом от активного потока. Определение кинетической энергии является одним из важных параметров при исследовании эжекторов с прерывистой струей: если энергия будет недостаточной для совершения работы, снаряд остановится и разрушится в рабочей камере, что приведет к сбою в работе эжектора, если энергия будет больше необходимой для совершения работы, то ее излишки будут гаситься в отводящем трубопроводе, что приведет к дополнительным потерям энергии и снижению КПД. Рассчитана зависимость массы снаряда от геометрических параметров сопла и времени истечения жидкости через сопло путем интегрирования объема жидкости. Описана методика определения оптимального времени истечения жидкости через сопло из уравнений кинетической энергии и необходимой энергии для совершения работы по сжатию газа с учетом потерь и минимально допустимой энергии снаряда. Под минимально допустимой энергией снаряда понимается энергия, при которой снаряд не теряет свою индивидуальность и движется общей массой в рабочей камере. В работе проиллюстрированы зависимости кинетической энергии от времени истечения для разных значений перепада давления и инерционной длины сопла. Полученные зависимости позволяют оценить влияние времени истечения на энергию, получаемую жидким снарядом. Определено, что основными параметрами, влияющими на кинетическую энергию снаряда, являются перепад давления на сопле, инерционная длина сопла и время выдержки сопла в открытом состоянии или времени истечения через сопло.

Ключевые слова: жидкий снаряд, импульсный струйный насос, физико-математическая модель, сопло с задвижкой, оптимальное время открытия, трубопроводный транспорт, энергия снаряда, сопловое устройство с импульсной подачей

Для цитирования: Влияние геометрических параметров соплового устройства и времени истечения жидкости на кинетическую энергию жидкого снаряда / М.А. Асфандияров, Д.Р. Исмагилов, А.Х.М. Али, К.А. Губайдуллина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 2. С. 5–12. DOI: 10.14529/engin250201

THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE NOZZLE DEVICE ON THE KINETIC ENERGY OF A LIQUID PROJECTILE

M.A. Asfandiyarov¹, *asfandiiarovma@susu.ru*
D.R. Ismagilov¹, *ismagilovdr@susu.ru*
A.H.M. Ali¹, *ahmadalhammory377@gmail.com*
K.A. Gubaidullina², *ksenya-aleksandrovna@list.ru*

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Gymnasium No. 23, Troitsk, Russia

Abstract. This article discusses the influence of the geometrical parameters of the nozzle device and the time of liquid outflow through the nozzle on the kinetic energy received by the liquid projectile from the active stream. The determination of kinetic energy is one of the important parameters in the study of intermittent jet ejectors: if the energy is insufficient to perform the work, the projectile will stop and collapse in the working chamber, which will lead to a malfunction in the ejector, if the energy is greater than necessary to perform the work, then its surplus will be extinguished in the outlet pipeline, which will lead to additional energy losses and a decrease in efficiency. The dependence of the mass of the projectile on the geometric parameters of the nozzle and the time of liquid flow through the nozzle is calculated by integrating the volume of liquid. Described is a method of determining optimum time for liquid to flow through a nozzle from equations of kinetic energy and the required energy for gas compression taking into account losses and minimum permissible energy of the projectile. The minimum permissible energy of the projectile is understood as the energy at which the projectile does not lose its individuality and moves with a total mass in the working chamber. The paper illustrates the dependence of kinetic energy on the outflow time for different values of pressure drop and inertial length of the nozzle. The obtained dependencies allow us to assess the effect of the outflow time on the energy received by the liquid projectile. It is determined that the main parameters affecting the kinetic energy of the projectile are the pressure drop on the nozzle, the inertial length of the nozzle and the holding time of the nozzle in the open state or the time of outflow through the nozzle.

Keywords: liquid projectile, pulse jet pump, physical and mathematical model, nozzle with valve, the optimal opening time, pipeline transport, projectile energy, nozzle device with pulse feed

For citation: Asfandiyarov M.A., Ismagilov D.R., Ali A.H.M., Gubaidullina K.A. The influence of the geometric parameters of the nozzle device on the kinetic energy of a liquid projectile. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025:25(2):5–12. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250201

Введение

Данная статья является продолжением исследования рабочего процесса эжектора с прерывистой струей. Ранее было рассмотрено влияние времени истечения жидкости через сопло на относительную скорость формируемого снаряда, определены закономерности изменения скорости на срезе и зависимости скорости от времени открытия сопла [1–8]. Разработанная методика определения оптимального времени истечения жидкости через сопло отражает только одну составляющую кинетической энергии – скорость, получаемую снарядом в фазе разгона [9, 10].

При формировании снаряда главную роль играет кинетическая энергия, передаваемая от активного потока снаряду, благодаря которой снаряд выполняет работу по сжатию газа или жидкости пассивной среды. При этом надо полагать, что, если энергия будет недостаточной для совершения работы, снаряд остановится в рабочей камере и произойдет сбой в работе эжектора [11]. Если энергия будет больше необходимой для совершения работы, то ее излишки будут гаситься в отводящем трубопроводе, что приведет к дополнительным потерям энергии и снижению КПД. Поэтому для повышения эффективности эжектора с прерывистой струей необходима методика

для определения оптимального времени истечения жидкости через сопло в зависимости от необходимой энергии снаряда, зависящей от параметров, в которых работает эжектор [12, 13].

Расчетная модель соплового блока

Уравнение энергии, передаваемой снаряду от активного потока:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (1)$$

где m – масса жидкого снаряда; v – мгновенная скорость снаряда в конце фазы разгона.

Как видно из уравнения, увеличение кинетической энергии на промежутке времени от 0 до достижения стационарной скорости истечения будет наибольшим ввиду увеличения массы и скорости одновременно, а после выхода на стационарную скорость увеличивается только масса и зависимость становится линейной [14].

Мгновенная скорость потока при нестационарном течении от времени открытия определяется по следующей зависимости:

$$V = V_{\infty} \cdot th \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right), \quad (2)$$

Поскольку истечение активного потока является нестационарным течением, масса жидкого снаряда может быть определена по следующему выражению:

$$m = \rho_{\text{ж}} \cdot \omega_c \cdot \int_0^t V dt, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность рабочей жидкости активного потока [15]; ω_c – площадь сопла на срезе [16].

Подставляя в это уравнение мгновенную скорость и интегрируя ее по времени, при начальных условиях $t_0 = 0$; $V_0 = 0$, получаем

$$m = \frac{2 \cdot l_c \cdot \omega_c \cdot \rho_{\text{ж}}}{1 + \xi_c} \cdot \ln \left(ch \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right) \right). \quad (4)$$

Уравнение энергии, передаваемой снаряду от активного потока, приобретает вид

$$E_{\text{кин}} = \frac{V_{\infty}^2 \cdot l_c \cdot \omega_c \cdot \rho_{\text{ж}}}{1 + \xi_c} \cdot \ln \left(ch \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right) \right) \cdot th^2 \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right). \quad (5)$$

Полученная аналитическая зависимость кинетической энергии снаряда при нестационарном течении от времени открытия задвижки позволяет рассчитать необходимое время истечения жидкости через сопло и для совершения этим снарядом работы по сжатию газа и преодоления сил сопротивления [17–21].

Результаты и обсуждения

На рис. 1, 2 приведены зависимости кинетической энергии снаряда от времени истечения жидкости через сопло при значении коэффициента сопротивления сопла $\xi_c = 0,05$, перепадах давления 100; 200; 300 и 400 кПа и инерционных длинах 0,1; 0,3; 0,5 и 1 м.

Анализ полученных графических зависимостей (см. рис. 1–4) показывает, что с увеличением инерционной длины при одном и том же давлении графики зависимости кинетической энергии от времени становятся более пологими. Это означает, что с увеличением инерционной длины замедляются темпы прироста кинетической энергии. Соответственно, при увеличении времени истечения через сопло или перепада давления на сопле темп прироста кинетической энергии увеличивается, однако это приводит кувеличению затрачиваемой энергии. При проектировании соплового устройства с прерывистой струей рекомендуется выбирать инерционную длину как можно меньше, что позволит уменьшить энергозатраты и увеличить производительность соплового устройства.

Переход от скорости снаряда к его кинетической энергии позволит, во-первых, упростить выбор времени истечения жидкости через сопло, во-вторых, сократить потери энергии, тем самым повысить КПД. Время истечения жидкости через сопло подбирается таким образом, чтобы кинетическая энергия снаряда была больше или равна суммарной энергии, необходимой для совершения работы по сжатию газа, с учётом потерь энергии в ходе движения и минимальной энергии снаряда, при которой он не потеряет своей индивидуальности. Оптимальная кинетическая энергия снаряда

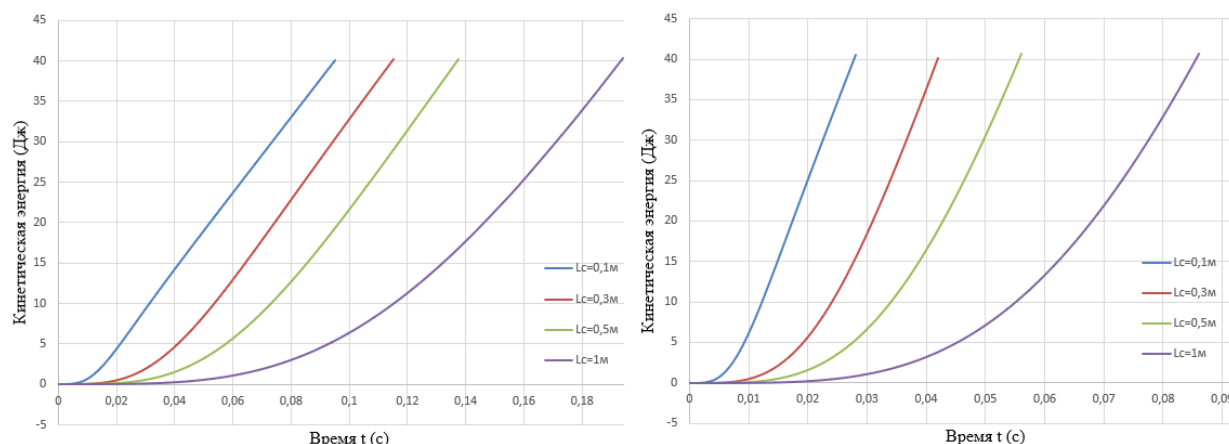


Рис. 1. График зависимости кинетической энергии от времени истечения жидкости через сопло задвижки при 100 и 200 кПа

Fig. 1. Graph of the dependence of the kinetic energy on the time of the liquid flow through the valve nozzle at 100 and 200 kPa

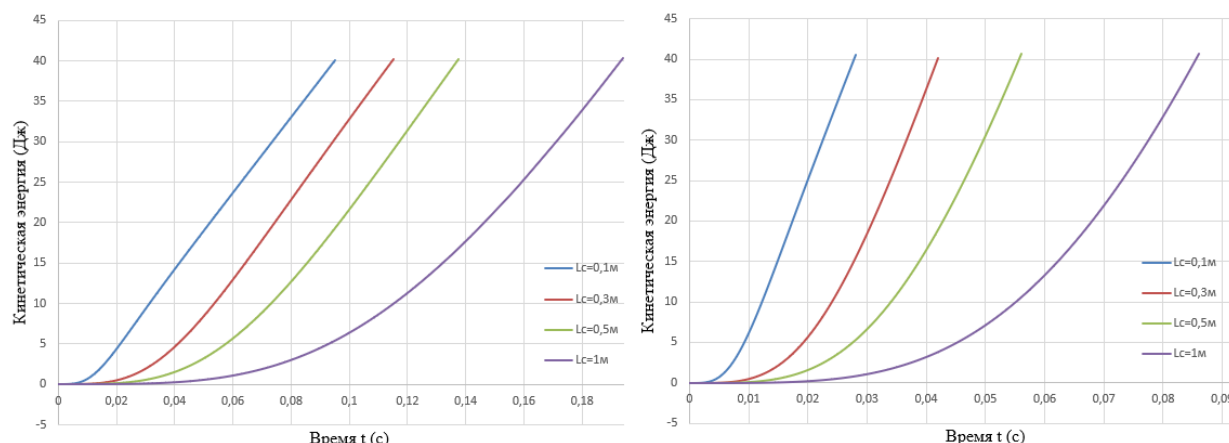


Рис. 2. График зависимости кинетической энергии от времени истечения жидкости через сопло задвижки при 300 и 400 кПа

Fig. 2. Graph of the dependence of the kinetic energy on the time of the liquid flow through the valve nozzle at 300 and 400 kPa

$$E_{\text{кин}} \geq E_{\text{необ}} = A_{\text{сж}} + \Delta E + E_0, \quad (6)$$

где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия снаряда; $A_{\text{сж}}$ – работа, необходимая для сжатия газа; ΔE – потери энергии на трение и местные сопротивления; E_0 – минимальная энергия, которой должен обладать снаряд, чтобы не потерять свою индивидуальность.

Работу по сжатию газа можем определить по следующей зависимости:

$$A_{\text{сж}} = \Delta p_{52} \cdot \omega_0 \cdot l_0, \quad (7)$$

где Δp_{52} – перепад давления на рабочей камере; ω_0 – площадь сечения рабочей камеры; l_0 – длина рабочей камеры.

Потери энергии на трение и местные сопротивления:

$$\Delta E = \Delta p_{\text{пот}} \cdot \omega_0 \cdot l_0, \quad (8)$$

где $\Delta p_{\text{пот}}$ – потери давления на трение и местные сопротивления.

Минимальная энергия, которой должен обладать снаряд, чтобы не потерять свою индивидуальность, будет получена опытным путем серии экспериментов. В первом приближении минимальную энергию можно принимать равной 20 % от суммы работы и потерь энергии при движении.

Вычислив необходимую энергию снаряда по уравнению (6) с помощью уравнения (5), определяем необходимое время открытия для разных исходных параметров соплового устройства, что позволит наиболее эффективно использовать эжектор с прерывистой струей.

Рассмотрим методику определения оптимального времени истечения для системы со следующими исходными данными: $\Delta p_{12} = 250 \text{ кПа}$; $\xi_c = 0,05$; $\rho_{\text{ж}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $l_c = 0,5 \text{ м}$, $\Delta p_{52} = 90 \text{ кПа}$; потери давления примем равными 10 %.

1. Определяется стационарная скорость истечения:

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \text{ Па}}{(1 + 0,05) \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} = 21,82 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2. Уравнение для определения необходимой энергии:

$$E_{\text{необ}} = 1,2 \cdot l_0 \cdot \omega_0 \cdot (\Delta p_{52} + \Delta p_{\text{пот}}) = 1,32 \cdot l_0 \cdot \omega_0 \cdot \Delta p_{52}. \quad (9)$$

3. Подставляя полученное уравнение в уравнение (5), получаем

$$\frac{1,32 \cdot \Delta p_{52} \cdot (1 + \xi_c)}{V_{\infty}^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \Omega \cdot \Lambda} = \ln \left(ch \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right) \right) \cdot th^2 \left(\frac{V_{\infty} \cdot (1 + \xi_c)}{2 \cdot l_c} \cdot t \right), \quad (10)$$

где $\Omega = \frac{\omega_c}{\omega_0}$ – относительная площадь сопла; $\Lambda = \frac{l_c}{l_0}$ – относительная длина сопла.

Принимая относительные площадь сопла и длину сопла 0,9 и 0,2 соответственно, решая итоговое уравнение относительно времени открытия, получаем оптимальное время открытия 0,0964 с. Данная методика позволяет наиболее точно рассчитывать оптимальное время открытия задвижки, в предыдущей статье [1] мы определили, что после 0,9 с изменения скорости практически не происходит, однако дальнейшее исследование процесса показало, что важно учитывать и массу снаряда, что напрямую влияет на его кинетическую энергию.

Заключение

1. В статье рассмотрено влияние основных геометрических параметров соплового устройства на кинетическую энергию, передаваемую снаряду активным потоком.

2. Получена аналитическая зависимость изменения кинетической энергии снаряда с учетом введенных допущений, а именно: жидкость несжимаема, открытие канала происходит мгновенно. Полученная зависимость позволяет рассчитать достаточную кинетическую энергию для совершения работы по сжатию газа с целью повышения эффективности эжектора с прерывистой струей.

3. Получены графики зависимости кинетической энергии от времени открытия сопла, анализ этих графиков показывает, как изменяется кинетическая энергия снаряда в зависимости от инерционной длины, при увеличении которой набор энергии снарядом замедляется, что отражается на КПД эжектора.

4. Получены зависимости необходимой суммарной энергии снаряда, требуемой для совершения работы по сжатию газа, преодоления потерь энергии в ходе движения в рабочей камере и минимальной энергии снаряда, при которой он не потеряет своей индивидуальности.

5. Разработана уточненная методика для определения оптимального времени истечения жидкости через сопло.

Список литература

1. Расчет оптимального времени истечения жидкого снаряда из сопла импульсного эжектора / М.А. Асфандияров, Д.Р. Исмаилов, А.Х.М. Али, С.Б. Школин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 1. С. 5–14. DOI: 10.14529/engin250101.

2. Chen J., Havtun H., Palm B. Parametric analysis of ejector working characteristics in the refrigeration system // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 69. P. 130–142. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.047.

3. Elbel S., Lawrence N. Review of recent developments in advanced ejector technology // International Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 62. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.031.

4. Galanis N., Sorin M. Review of recent developments in advanced ejector technology // International Journal of Thermal Sciences. 2016. Vol. 104. P. 315–329. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.12.022.

5. Kong F.S., Jin Y.Z., Kim H.D. Analytical and computational studies on the vacuum performance of a chevron ejector // Shock Waves. 2016. Vol. 26. P. 771–788. DOI: 10.1007/s00193-015-0618-8.

6. Han Q., and et. Model optimization and mechanism analysis of two-stage ejector considering nonequilibrium condensation // *Energy*, 2024, vol. 310, 133271. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133271.
7. Sun W., and et. Numerical analysis of two-stage vacuum ejector performance considering the influence of phase transition and non-condensable gases // *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 269, 118730. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118730.
8. Performance analysis of a two-stage ejector in an ejector refrigeration system using computational fluid dynamics / N. Suvarnakuta, K. Pianthong, T. Sriveerakul, W. Seehanam // *Engineering applications of computational fluid mechanics*. 2020. Vol. 14, no. 1. P. 669–682. DOI: 10.1080/19942060.2020.1756913.
9. Tashtoush B.M., Al-Nim M.A., Khasawneh M.A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications // *Applied Energy*, 2019. Vol. 240. P. 138–172. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185.
10. Битюцких С.Ю., Спиридонов Е.К. Исследование и расчет гидродинамики в струйном нагнетателе // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2016. Т. 16, № 1. С. 5–15. DOI: 10.14529/engin160101.
11. Школин С.Б. Исследование предельных режимов и разработка метода расчета жидкостногазового эжектора: дис. ... канд. техн. наук 05.04.13. Челябинск, 2009. 159 с.
12. Study on the bubble breakup and internal flow characteristics in the pulsed jet ejector / H. Bie, J. He, K. Chen, L. Xue, G. Liu, Z. Hao // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2024. Vol. 202. 109836. DOI: 10.1016/j.ccep.2024.109836.
13. Shi W. Modelling of breakage rate and bubble size distribution in bubble columns accounting for bubble shape variations / W. Shi, J. Yang, G. Li, X. Yang, Y. Zong, X. Cai // *Chemical Engineering Science*. 2018. Vol. 187. P. 391–405. DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.013.
14. Spiridonov E.K., Ali A.H. Hydro-pulse compressor, working process and characteristics // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243908
15. Zhengyang An, Weiguo Liang. Research on Status and Development of Jet Pump. International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015): 1519–1522
16. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
17. Цегельский, В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 408 с.
18. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения // *Лопаточные машины и струйные аппараты*. 1971. Вып. 5. С. 175–261.
19. Пат. 110434 Российская Федерация, МПК7 F 04 F 5/00. Эжектор / П.Н. Манин. № 2011125820/06; заявл. 23.06.11; опубл. 20.11.11, Бюл. № 32.
20. Вулис Л.А., Михасенко Ю.И., Хитриков В.А. Об эффективном управлении распространением свободной турбулентной струи // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1966. № 6.
21. Спиридонов Е.К. Формирование прерывистой струи // *Динамика пневмогидравлических систем: тематич. сб. научн. тр.* Челябинск: ЧПИ, 1983. С. 42–52.

References

1. Asfandiyarov M.A., Ismagilov D.R., Ali A.H.M., Shkolin S.B. Calculation of the optimal time of liquid projectile outflow from the nozzle of a pulse ejector. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025;25(1):5–14. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250101
2. Chen J., Havtun H., Palm B. Parametric analysis of ejector working characteristics in the refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 130–142. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.047.
3. Elbel S., Lawrence N. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 62, p. 1–18. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.031.
4. Galanis N., Sorin M. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, vol. 104, p. 315–329. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.12.022.
5. Kong F.S., Jin Y.Z., Kim H.D. Analytical and computational studies on the vacuum performance of a chevron ejector. *Shock Waves*, 2016, vol. 26, p. 771–788. DOI: 10.1007/s00193-015-0618-8.

6. Han Q., Feng H., Zhang H., Wang L., Xue H., Sun W., Jia L. Model optimization and mechanism analysis of two-stage ejector considering nonequilibrium condensation. *Energy*, 2024, vol. 310, 133271. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133271.
7. Sun W., Liu C., Zhang H., Sun W., Xue H., Jia L. Numerical analysis of two-stage vacuum ejector performance considering the influence of phase transition and non-condensable gases. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 269, 118730. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118730.
8. Suvarnakuta N., Pianthong K., Sriveerakul T., Seehanam W. Performance analysis of a two-stage ejector in an ejector refrigeration system using computational fluid dynamics. *Engineering applications of computational fluid mechanics*, 2020, vol. 14, no. 1, 669–682. DOI: 10.1080/19942060.2020.1756913
9. Tashtoush B.M., Al-Nim M.A., Khasawneh M.A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy*, 2019, vol. 240, pp. 138–172. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185.
10. Bityutskikh S.Yu., Spiridonov E.K. Research and calculation of hydrodynamics in a jet pump. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin160101.
11. Shkolin S.B. *Issledovaniye predel'nykh rezhimov i razrabotka metoda rascheta zhidkostnogazovogo ezhektora: Dis. Cand. tech. nauk* [Study of limit modes and development of calculation method for liquid-gas ejector. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2009. 159 p.
12. Bie H., He J., Chen K., Xue L., Liu G., Hao Z. Study on the bubble breakup and internal flow characteristics in the pulsed jet ejector. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2024, Vol. 202, 109836. DOI: 10.1016/j.cep.2024.109836.
13. Shi W., Yang J., Li G., Yang X., Zong Y., Cai X. Modelling of breakage rate and bubble size distribution in bubble columns accounting for bubble shape variations. *Chemical Engineering Science*. 2018, Vol. 187, pp. 391–405. DOI: 10.1016/j.ces.2018.05.013.
14. Spiridonov E.K., Ali A.H. Hydro-pulse compressor, working process and characteristics. 2020 *International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM)*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243908
15. Zhengyang An, Weiguo Liang. Research on Status and Development of Jet Pump. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015)*: 1519–1522.
16. Sokolov E.Y., Singer N.M. *Struynnye apparaty* [Jet devices]. Moscow, 1989. 352 p.
17. Tsegelsky V.G. *Dvukhfaznyye struynnye apparaty* [Two-phase inkjet devices]. Moscow, 2003. 408 p.
18. Vasiliev Y.N. Theory of a two-phase gas-liquid ejector with a cylindrical mixing. *Shovel machines and jet apparatuses*, 1971, iss. 5, pp. 175–261. (In Russ.)
19. Manin P.N. *Ezhektor* [Ejector]. Patent. 110434 Russian Federation. No. 2011125820/06; declared. 23.06.11; published. 20.11.11, Bulletin No. 32.
20. Vulis L.A., Mikhasenko Y.I., Khitrikov V.A. On effective control of the propagation of a free turbulent jet. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. MZhG*, 1966, no. 6. (In Russ.)
21. Spiridonov E.K. Formation of an intermittent jet. *Dynamics of pneumohydraulic systems: Thematic collection of scientific papers*. Chelyabinsk, 1983 pp. 42–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Асфандияров Марат Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asfandiiarovma@susu.ru

Исмагилов Денис Рашидович, старший преподаватель кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ismagilovdr@susu.ru

Али Ахмад Хасан Мустафа, аспирант кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ahmadalhammory377@gmail.com

Губайдуллина Ксения Александровна, заведующий кафедрой «Гуманитарные дисциплины», МАОУ «Гимназия № 23», Троицк, Россия; ksenya-aleksandrovna@list.ru

Information about the authors

Marat A. Asfandiyarov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Hydraulics and Hydropneumosems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asfandiiarovma@susu.ru

Denis R. Ismagilov, Senior Lecturer of the Department “Aeronautical Engineering”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ismagilovdr@susu.ru

Ahmad Hassan Mustafa Ali, Postgraduate student of the Department of “Hydraulics and Hydropneumosems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ahmadalhammory377@gmail.com

Ksenia A. Gubaidullina, Head of the department of Humanitarian disciplines, Gymnasium No. 23, Troitsk, Russia; ksenya-aleksandrovna@list.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2025; принята к публикации 29.05.2025.

The article was submitted 22.05.2025; accepted for publication 29.05.2025.